Technical Note

Public Works Canada Travaux publics Canada

Solar Programs Office (613) 998-9617

No. 22: March, 1984

The Effect of Load Parameters on Solar System Thermal Performance

1. SYNOPSIS

This Note investigates the effects of load size, load profile, and hot water set temperature on system thermal performance. The WATSUN IV computer program is used to introduce various load sizes, load profiles and set temperatures to a base model. The results indicate that variations in load size have a significant effect on the thermal performance of the system. However, variations in load profile and hot water set temperature have little effect on system performance. Therefore, load size is a key parameter in sizing solar systems, and hot water consumption should be monitored prior to system design and installation.

2. INTRODUCTION

Solar system thermal performance depends not only on the performance of individual system components, but also on the total energy requirement, or load. A recent review of hot water consumption in a number of commercial, residential and industrial applications highlights this fact. Based on reports (2) to (5), prepared by various organizations involved in the solar industry, the review shows that most buildings monitored for hot water demand usually consume less energy (hot water) than theoretical calculations indicate, cutting overall system performance.

Therefore, it is important to establish load parameters in sizing a system to achieve maximum thermal performance (GJ/a). In this Note, the effects of load size (L/d), load profile, and hot water set temperature (T_{req}) on thermal

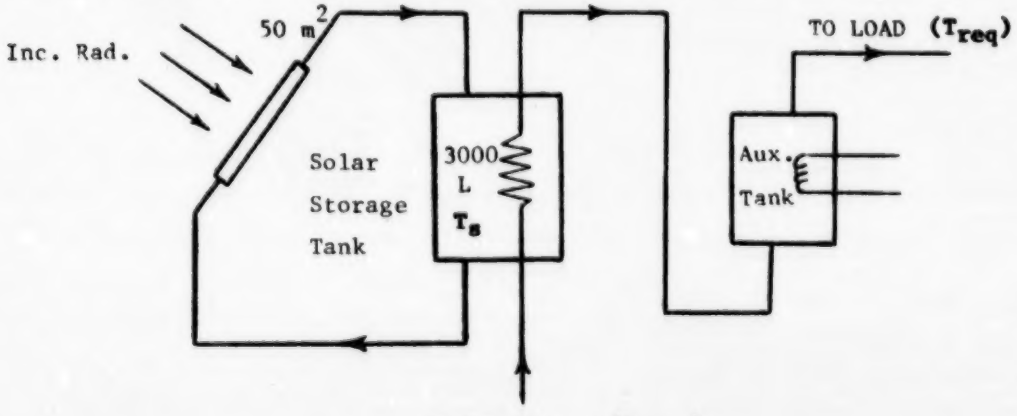
performance are determined using the WATSUN IV (1) computer program. A base system is defined for use in the simulation, and an analysis of the WATSUN IV algorithms and assumptions is carried out to establish the mathematical relationships among various design parameters within the program.

To investigate load profiles, a number of measured load profiles from commercial, industrial and residential buildings are studied and typical profiles are selected and used in the simulation. Various load sizes and set temperatures are investigated.

3. SIMULATION TOOL

The annual thermal performance (GJ/a) of conventional solar water heating systems is studied using the WATSUN IV program. WATSUN IV is an interactive computer program that uses hourly weather data to simulate the performance of a variety of solar energy systems.

A typical solar liquid system, as shown in Figure 1, is used as a base model for the investigation. The DHW Advanced Module is used for all simulations.



Heat Exchangers' Effectiveness (ε) = 1

Figure 1: Base Solar Domestic Hot Water System

4. BASE SOLAR SYSTEM

The hot water load profile is based on a standard residential load profile used in computer programs such as TRNSYS, FCHART and WATSUN. The following parameters are used:

- Load: 2500 L/d
- Temperature rise (ΔT): 50°C
  (constant water mains temperature of 10°C and hot water set temperature of 60°C)
- Collector area: 50 m^2
- $F_R(\tau\alpha)$ = 0.73
- $F_R U_L$ = 8.18 $W/(m^2.°C)$
- Collector tilt: 45° (latitude of Montréal, Canada)
- Storage tank capacity: 60 L/m^2 of collector area (fully mixed with no stratification)
- Weather data based on 1970 hourly measurements for Montréal, Canada.

5. THE WATSUN ALGORITHM FOR WATER HEATING LOAD MODEL

The general mass and heat transfer equation can be expressed as:

$$dq = \dot{m} \cdot Cp \cdot dT \qquad (1)$$

where dq represents the rate of change of internal energy of the liquid, $\dot{m}$ is the mass flow rate, Cp is the specific heat, and dT is the temperature change of the liquid.

The hourly domestic hot water demand, Q_{dhw}, is described by a daily profile that is a step function of energy required versus time of day (6). Q_{dhw} can be defined as:

$$Q_{dhw} = \dot{m} \cdot Cp \cdot (T_{req} - T_{main}) \qquad (2)$$

where T_{main} and T_{req} are main supply water temperature and set temperature.

The rate of heat supplied to the load from the storage is calculated by:

$$Q_{shw} = Q_{dhw}\left[\frac{T_s - T_{main}}{T_{req} - T_{main}}\right] \qquad (3)$$

where T_s is the storage temperature.

Equation (2) shows the dependence of Q_{dhw} on $\dot{m}$, the mass flow rate (quantitative), and ΔT, the temperature rise of the fluid (qualitative).

Q_{shw} is also dependent on the load, Q_{dhw}. Substituting Q_{dhw} from equation (2) in equation (3):

$$Q_{shw} = \dot{m}\cdot Cp\cdot(T_s - T_{main}) \qquad (4)$$

Despite the dependency of solar energy supplied, Q_{shw}, on the load, as indicated in equation (3), Q_{shw} is independent of the quality of the load (T_{req}) and is only a function of the quantitative portion of the load. From equation (4) it can be seen that Q_{shw} is dependent on storage temperature, T_s. However, the solar energy supplied is independent of the set temperature, provided the solar energy supplied does not exceed the load, i.e. provided the solar fraction is not greater than 100%. The solar fraction may exceed 100% on an hourly or a daily basis.

6. EFFECTS OF VARYING LOAD PARAMETERS ON THERMAL PERFORMANCE

6.1 Load Profile

Several measured hourly load profiles for various solar applications are studied to obtain "typical" profiles for commercial, industrial and residential applications. These are incorporated into the computer simulation (see Figure 2). To observe the effect of weekend, as well as weekday schedules on system thermal performance, profiles are incorporated in the model for residential applications. The WATSUN IV computer program can simulate discrete weekday and weekend profiles as well as a seven-day profile. Figure 3 shows the results of hot water load profiles for five homes monitored on an hourly basis by Ontario Hydro (7) for a period of

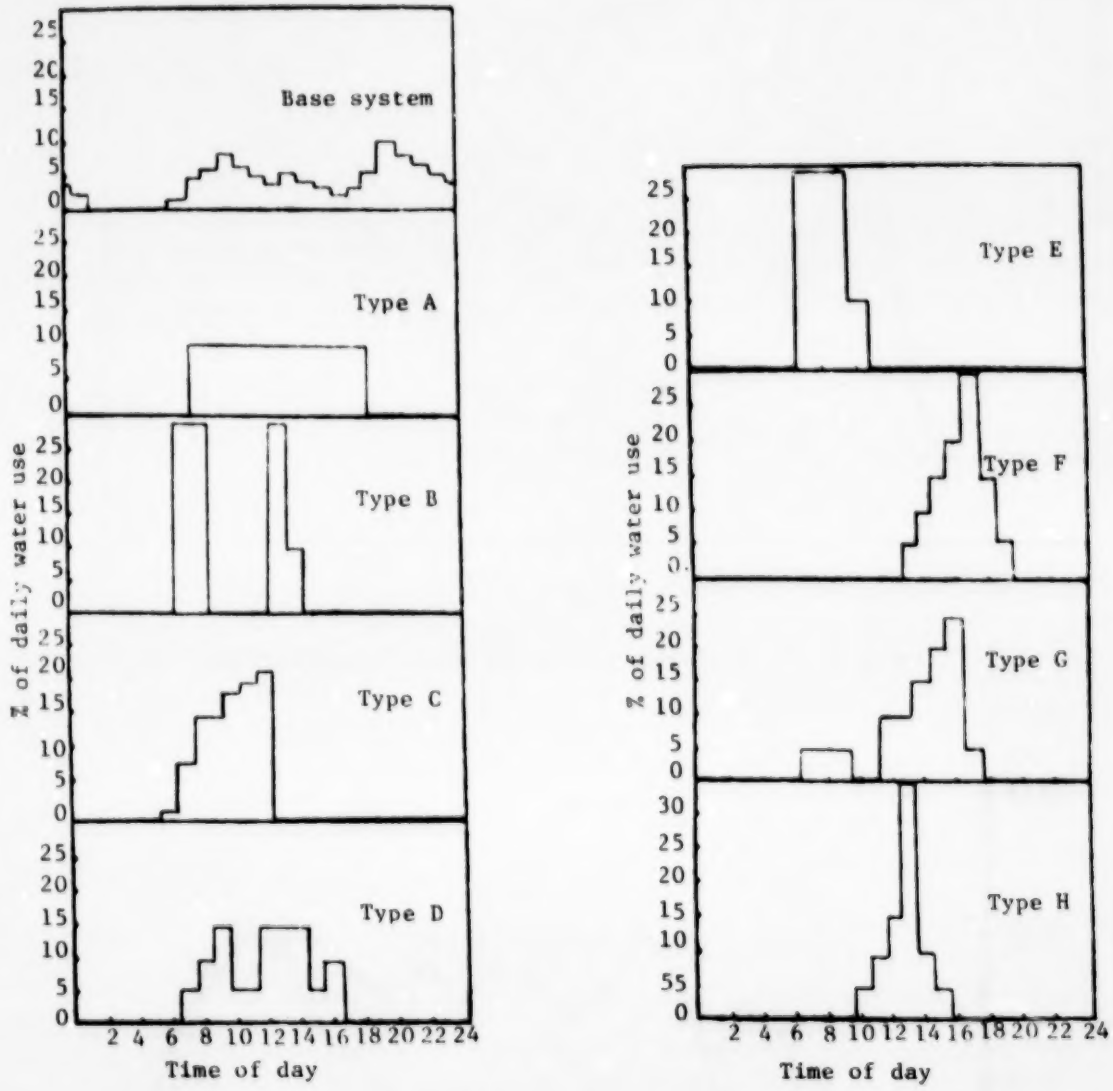


Figure 2: Time Distribution of Hot Water Usage

Daily Total (L/d)	
Mon.	200
Tues.	180
Wed.	210
Thurs.	200
Fri.	196
Sat.	254
Sun.	310
Weekly total (L)	1500

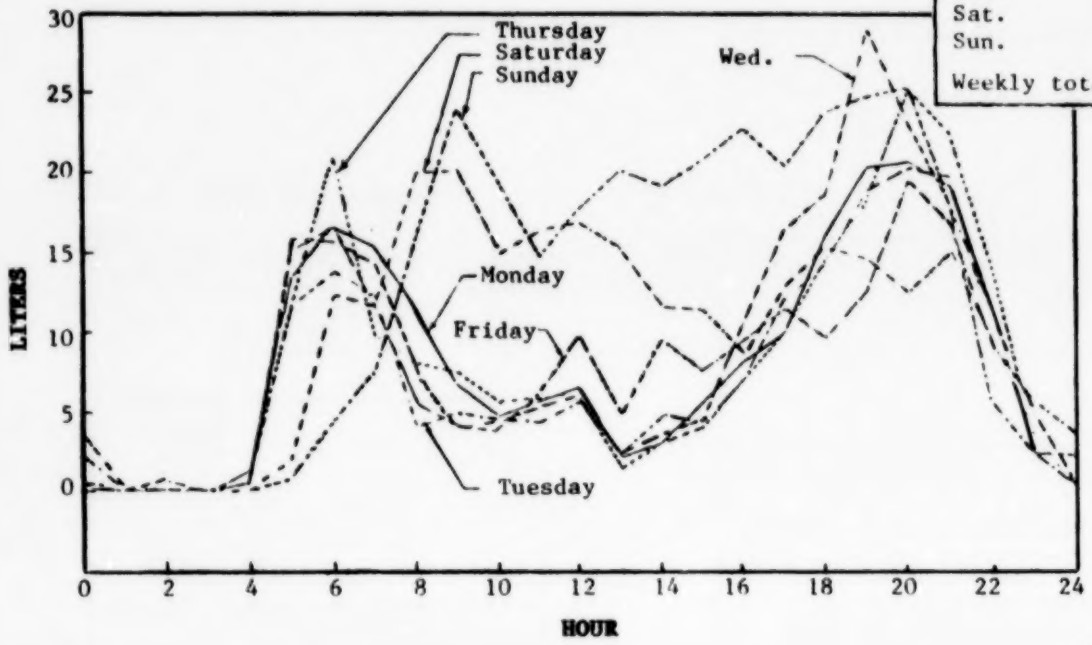


Figure 3: Measured Hourly Hot Water Load Profiles

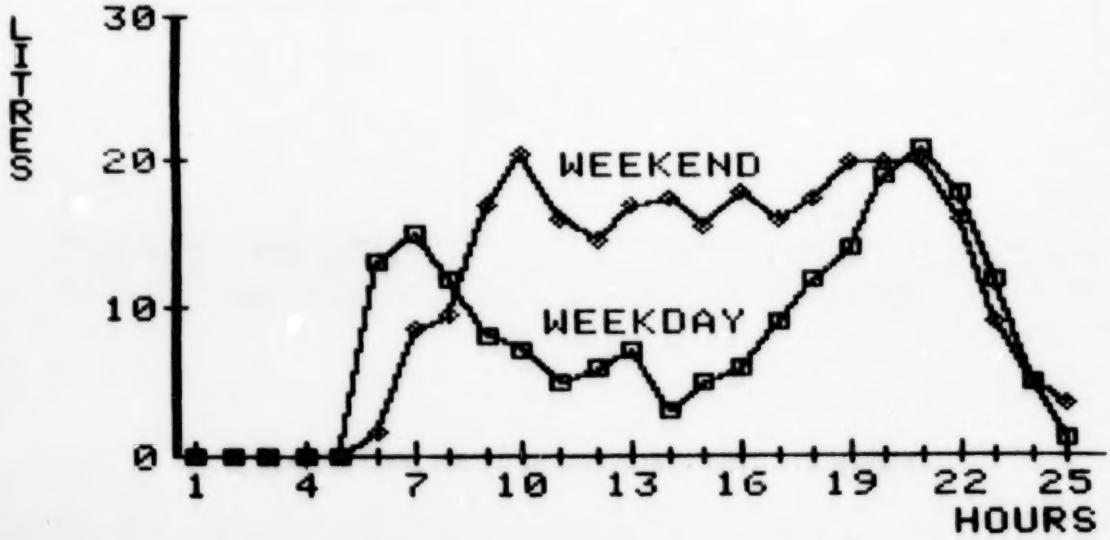


Figure 4: Averaged Hourly Hot Water Load Profiles

one year. Preliminary results for another 50 systems monitored by the utility indicate that hot water load profiles dc not differ greatly from this sample of five homes.

To simulate the system using the hot water load profile presented in Figure 3, the Monday to Friday load profiles are averaged to give a weekday load profile as shown in Figure 4. Similarly, the Saturday and Sunday load profiles are averaged to give a weekend load profile. The annual thermal performance for each load profile is then determined using the WATSUN IV program. The results are shown in Table 1.

Table 1
Effect of Load Profile on
Annual Thermal Performance

Type of Load Profile	Annual Thermal Performance GJ/a	Difference %
Base System	80.30	0.0
Type A	80.72	0.5
Type B	84.31	5.0
Type C	79.65	-0.8
Type D	81.28	1.2
Type E	81.08	1.0
Type F	82.79	3.1
Type G	82.87	3.2
Type H	83.59	4.1
Base Profile (weekday & weekend)	79.67	-0.8
Measured Profile (weekday & weekend)	80.03	-0.3

From Table 1, a variation in hot water load profile does not have a significant effect on the annual thermal performance (GJ/a) of the system. The maximum variation (5.0%) in system performance resulted from load profile Type B, Figure 2. Even when considering different load profiles for weekdays and weekends (see Figure 4) the thermal performance did not vary significantly.

6.2 Load Size

The annual thermal performance of the base solar system with various ratios of design load to measured consumption is estimated using the WATSUN IV program. The results indicate that most buildings monitored for demand usually require much less hot water than is theoretically calculated. In some cases, the ratio of design load to measured consumption is greater than 5:1.

The results, shown in Table 2, indicate that system thermal performance is significantly diminished when actual hot water consumption is less than expected when the system was designed. For instance, for a ratio of 1:3, the overall thermal performance is reduced by 46.5%.

Table 2

Effect of Load Size on Annual Thermal Performance

Ratio of Actual DHW Load (L/d) / Design DHW Load (L/d)	Annual Thermal Performance GJ/a	Difference %
0.20	29.73	-63.0
0.25	35.10	-56.3
0.33	42.92	-46.5
0.50	55.49	-30.9
1.00	80.28	0.0
1.20	87.12	+8.5
1.40	92.73	+15.5
2.00	105.26	+31.1
3.00	117.86	+46.8
5.00	131.20	+63.4

6.3 Hot Water Set Temperature

From equation (1), the total energy load is a function of hot water set temperature. The hot water set temperature of the base system is changed for a number of WATSUN IV simulations and the results are summarized in Table 3. An increase in the hot water set temperature (qualitative portion of the load) results in a corresponding increase in load, but has little effect on solar system thermal performance. (Set temperature has an effect on thermal performance only when the solar energy supplied exceeds the load, i.e. the solar fraction exceeds 100% for any given hour. This effect is more pronounced for lower set temperatures.)

Table 3
Effect of Set Temperature on
Annual Thermal Performance

Hot Water Required Temp. °C	Annual Thermal Performance GJ/a	Difference %
60	80.30	0.0%
65	80.34	+0.05%
70	80.37	+0.09%
85	80.67	+0.46%
55	80.01	-0.36%
50	79.64	-0.82%
40	75.27	-6.26%

7. CONCLUSIONS

The load parameters for a conventional solar liquid system with an adequately sized storage tank are:

- load size (L/d), which has a significant effect on system thermal performance;
- load profile, which has no significant effect on system thermal performance, and;
- set temperature (T_{req}), which has an effect on system thermal performance only if it is set so low that the hourly solar energy supplied exceeds the load, i.e. the solar fraction is greater than 100%.

8. REMARKS AND RECOMMENDATIONS

Load size is a major parameter affecting system thermal performance. Inaccurate load calculations will result in improperly sized systems and possible malfunctioning of system components, as well as reduction in system performance.

It is recommended that hot water load be monitored prior to design and installation of a solar water heating system. This is considered essential for large and medium size applications. Given the relatively low cost of flow meters, the return on investment can be substantial.

9. REFERENCES

1. The WATSUN IV computer simulation program was prepared for the National Research Council of Canada by the System Design Energy Group, Dept. of Systems Design Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Canada.

2. "Hot Water Load Profiles", IBI Group and Watershed Energy Systems Ltd. Submitted to National Research Council of Canada, October 1981.

3. "An Analysis of Solar Commercial Hot Water Systems", Canadian Solar Industries Association. Final report submitted to Solar Programs Office, Public Works Canada, April 1982.

4. "Profiles of Promising Industries and Apartment Dwellings for Solar Systems Trails Planning", Hickling Partners Inc. Submitted to Solar Energy Program, NRC, December 1981.

5. "Consumer Hot Water Use Pattern Study", Canadian Electrical Association, Residential Marketing Development and Standards Section, 1970.

6. WATSUN III Solar Heating Simulation and Economic Evaluation Program, Liquid Based Solar Heating System, May 1979.

7. "Laboratory Tests of Six Solar Water Heating Systems", R. Chen, Ontario Hydro, Canada. Energex '82.

8. "Optimization of Several Solar Domestic Hot Water System Parameters", J.E. Ferguson, P.Eng. and H.F. Sullivan, P.Eng. Energex '82.

Guide technique

Travaux publics Canada | Public Works Canada

Bureau des programmes solaires (613) 996-9817

N° 22: mars 1984

L'effet des paramètres de la charge sur la performance thermique d'un système solaire

1. SOMMAIRE

La présente note d'information explore les effets de la grandeur de la charge, du profil de la charge et de la température de réglage de l'eau chaude sur la performance thermique d'un système. Le programme informatique WATSUN IV est utilisé pour fixer dans un modèle de base divers profils, grandeurs de charge et températures de réglage. Les résultats nous apprennent que les variations de la grandeur de la charge ont un effet significatif sur la performance thermique du système, alors que celles du profil et de la température de réglage de l'eau chaude se répercutent assez peu sur cette performance. La grandeur de la charge est donc un paramètre clé du dimensionnement et la consommation d'eau chaude doit être surveillée avant la conception et l'installation du système.

2. INTRODUCTION

La performance thermique d'un système solaire n'est pas déterminé seulement par la performance de ses composants individuels, mais également par le besoin total en énergie, c.-à-d. la charge. Récemment, une revue portant sur la consommation d'eau chaude dans un certain nombre d'applications commerciales, résidentielles et industrielles a mis en lumière ce fait. A partir des rapports (2) à (5), émanant de divers organismes reliés à l'industrie solaire, cette revue montre que les immeubles dont on a évalué les besoins en eau chaude consomment généralement moins d'énergie (moins d'eau chaude) que ce qu'indiquent les calculs théoriques, diminuant par le fait même la performance globale du système.

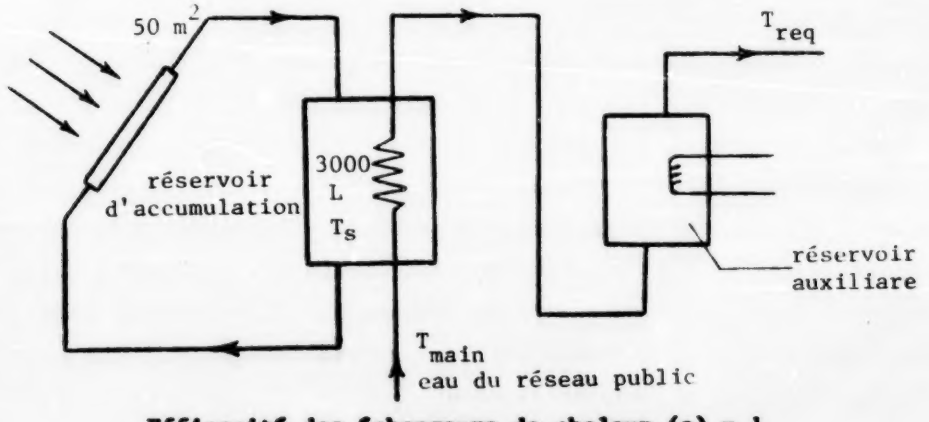
C'est pourquoi il est important d'établir les paramètres de la charge lors du dimensionnement d'un système afin d'obtenir la performance thermique maximale (GJ/a). Dans la présente note d'information, on caractérise l'effet de la grandeur de la charge (L/d), de son profil et de la température de réglage de l'eau chaude (T_{req}) sur la performance thermique, au moyen du programme informatique WATSUN IV (1). La simulation repose sur un système de base, pour lequel on analyse les algorithmes et les hypothèses de WATSUN IV afin de fixer, à l'intérieur du programme, les relations mathématiques entre les divers paramètres théoriques.

Pour ce qui est des profils de charge, on a étudié un certain nombre de profils mesurés dans des bâtiments commerciaux, industriels et résidentiels, et on a choisi des profils types pour la simulation. Diverses grandeurs de charge et températures de réglage ont été étudiées.

3. LE MODÈLE DE SIMULATION

La performance thermique annuelle (GJ/a) d'un chauffe-eau solaire classique est étudiée en faisant appel au programme WATSUN IV, un programme informatique interactif qui simule à partir de données météorologiques horaires les performances d'un éventail de systèmes à énergie solaire.

La Figure 1 nous montre un système type de chauffage solaire à fluide, celui-là même utilisé comme modèle de base pour notre étude. Pour toutes les simulations on a utilisé le module avancé ECD (eau chaude domestique).



Efficacité des échangeurs de chaleur (ε) = 1

Figure 1: Système de base de chauffe-eau domestique

4. SYSTÈME SOLAIRE DE BASE

Le profil de charge de l'eau chaude est basé sur le profil de charge résidentielle normalisé qu'utilisent des programmes informatiques comme TRNSYS, FCHART et WATSUN. On a utilisé les paramètres que voici:

- Charge: 2500 L/d
- Élévation de température (ΔT): 50°C
  (la température de l'eau du réseau public est gardée constante à 10°C et la température de l'eau chaude est réglée à 60°C)
- Superficie du capteur solaire plan: 50 m^2
- $F_R(\tau\alpha)$ = 0,73
- $F_R U_L$ = 8,18 $W/(m^2.°C)$
- Inclinaison du capteur plan: 45° (latitude de Montréal, Canada)
- Capacité du réservoir d'accumulation: 60 L/m^2 de surface du capteur solaire plan (mélange parfait sans stratification)
- Données météorologiques basées sur les mesures horaires de 1970 effectuées à Montréal (Canada)

5. L'ALGORITHME DE WATSUN APPLIQUÉ AU MODÈLE DE CHAUFFE-EAU DE LA CHARGE

L'équation générale de transfert de la masse et de la chaleur a la forme suivante:

$$dq = \dot{m} \cdot Cp \cdot dT \qquad (1)$$

où dq représente le taux de changement de l'énergie interne du fluide, $\dot{m}$ est le débit de masse, Cp est la chaleur spécifique, et dT est la variation de température du fluide.

Le besoin horaire en eau chaude domestique, Q_{ecd}, est décrit par un profil quotidien qui en est fait une fonction en escalier de l'énergie requise en fonction de l'heure du jour (6). Q_{ecd} peut être défini ainsi:

$$Q_{ecd} = \dot{m} \cdot Cp \cdot (T_{req} - T_{dist}) \qquad (2)$$

où T_{dist} et T_{req} sont respectivement la température de l'eau distribuée par le réseau public et la température de réglage.

Le taux de chaleur fournit à la charge par le réservoir d'accummulation est calculé au moyen de:

$$Q_{ecf} = Q_{ecd}\left[\frac{T_a - T_{dist}}{T_{req} - T_{dist}}\right] \qquad (3)$$

où T_a est la température de l'accummulateur.

L'équation (2) nous fait voir que Q_{ecd} dépend de $\dot{m}$, le débit massique (facteur quantitatif) et de ΔT, l'élévation de température du fluide (facteur qualitatif).

Q_{ecf} est également fonction de la charge, Q_{ecd}. En substituant Q_{ecd} de l'équation (2) dans l'équation (3), il vient:

$$Q_{ecf} = \dot{m}\cdot Cp\cdot(T_a - T_{dist}) \qquad (4)$$

En dépit du fait que l'énergie solaire fournie (Q_{ecf}) dépend de la charge, comme l'exprime l'équation (3), on voit que celle-ci est indépendante de la qualité de la charge (T_{req}), et n'est fonction que de la partie quantitative de la charge. L'équation (4) nous apprend que Q_{ecf} dépend de la température de l'accumulateur (T_a). Toutefois, l'énergie solaire fournie reste indépendante de la température de réglage aussi longtemps que cette valeur de dépasse pas la charge, c.-à-d. que la fraction d'énergie solaire n'est pas supérieure à 100%. La fraction d'énergie solaire peut toutefois dépasser 100% sur une base horaire ou journalière.

6. EFFETS DE LA VARIATION DES PARAMÈTRES DE CHARGE SUR LA PERFORMANCE THERMIQUE

6.1 Profil de charge

Plusieurs profils de charge horaires mesurés dans un grand nombre d'applications de chauffage solaire ont été étudiés afin de cerner des profils "types" pour des applications commerciales, industrielles et résidentielles. On a ensuite intégré ces profils à la simulation informatique (voir la Figure 2). Pour observer les effets sur la performance thermique du système des jours de fin de semaine de même que des jours de travail, on a intégré dans le modèle des profils relatifs à des applications résidentielles. Le programme WATSUN IV peut simuler des profils

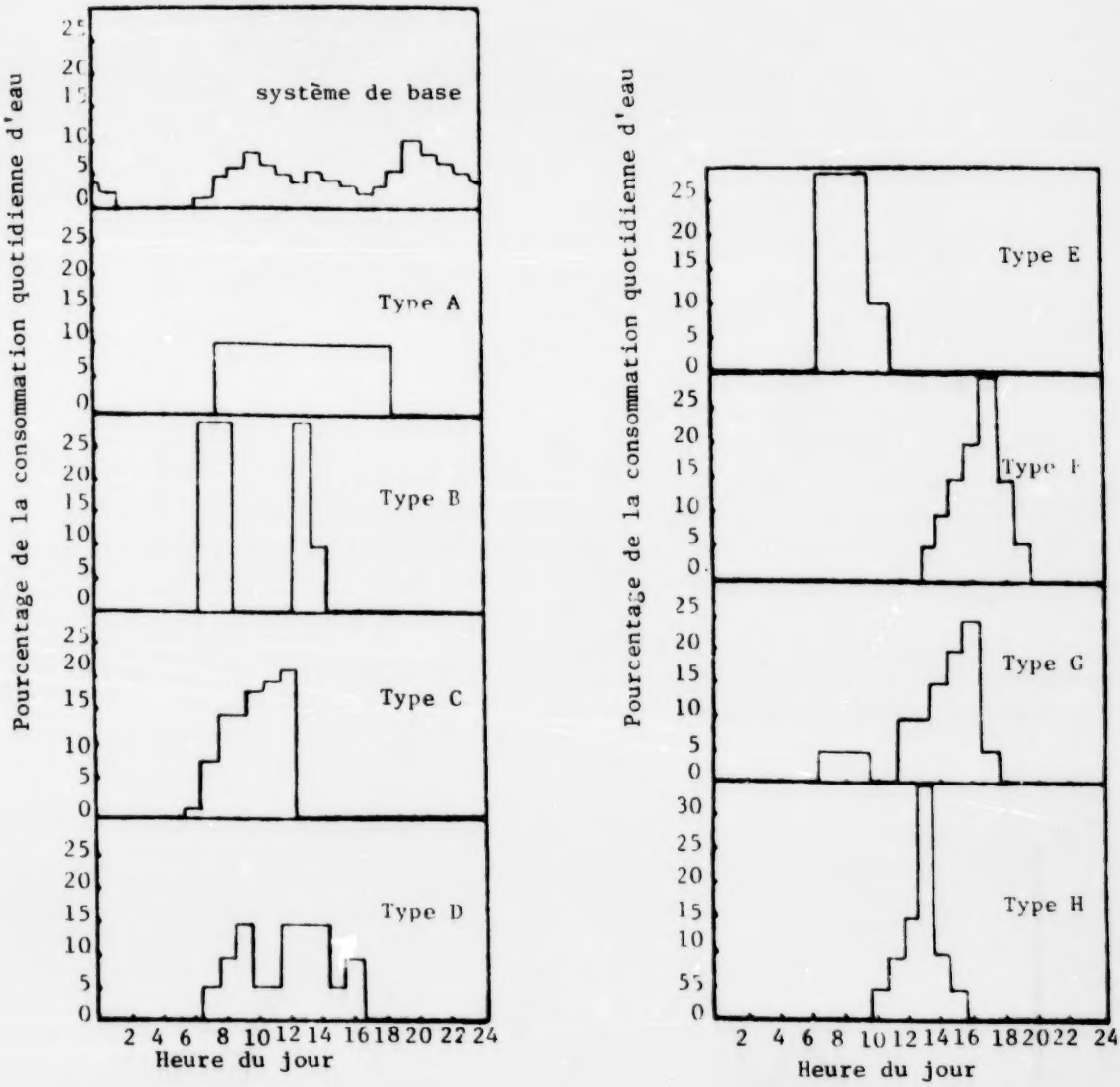


Figure 2: Répartition en fonction de l'heure du jour de la consommation d'eau chaude

Total quotidien (L)	
lundi	200
mardi	180
mercredi	210
jeudi	200
vendredi	196
samedi	254
dimanche	310
Total hebdomadaire (L)	1500

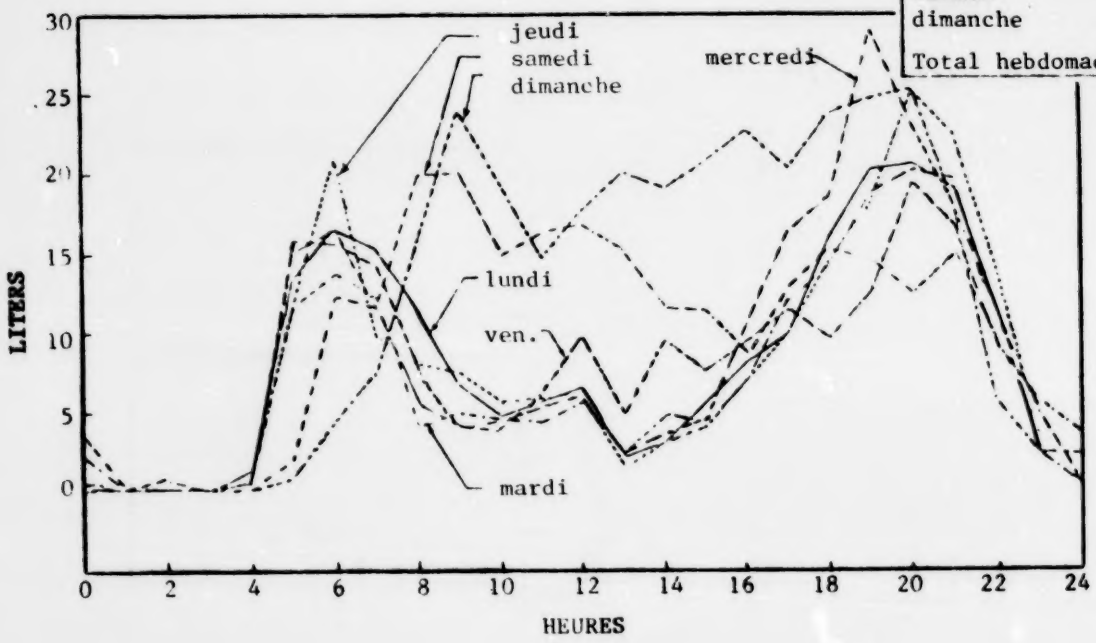


Figure 3: Profils horaires de charge mesurés pour l'eau chaude

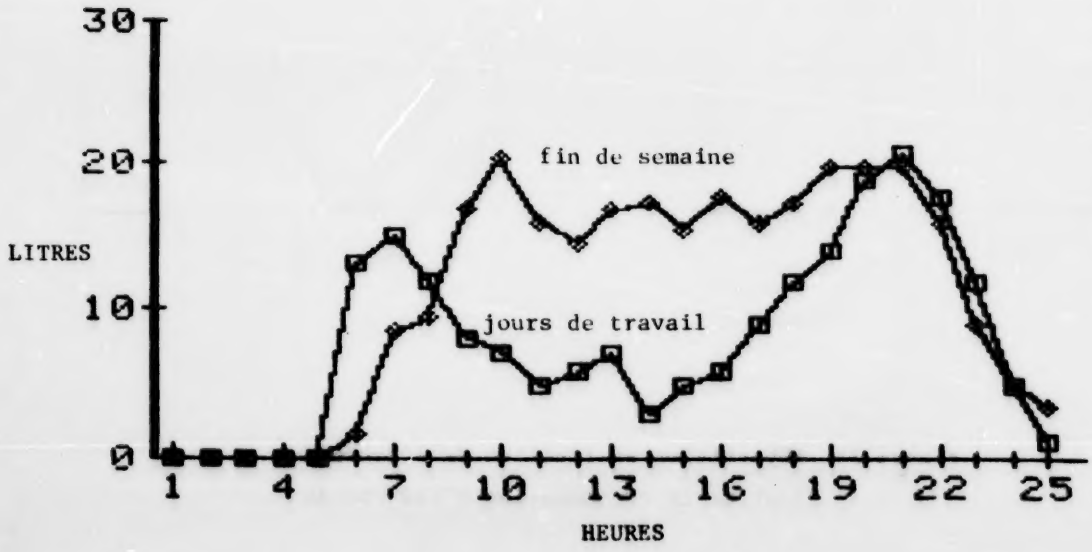


Figure 4: Profils horaires de charge moyens pour l'eau chaude

distincts correspondant à une journée de la semaine ou à une journée de la fin de semaine, de même que des profils pour les sept jours. On peut voir à la Figure 3 les résultats des profils de charge horaires de l'eau chaude pour cinq maisons étudiées par Hydro-Ontario (7) pendant une année. Les résultats préliminaires d'un autre groupe de 50 systèmes étudiés par la même compagnie de service public indiquent que les profils de charge de l'eau chaude ne sont pas sensiblement différents de ceux de l'échantillon de cinq maisons.

Pour simuler le système en utilisant le profil de charge de l'eau chaude de la Figure 3, on a fait la moyenne des profils de charge de lundi à vendredi pour obtenir le profil de charge des jours de semaine illustré à la Figure 4. De la même façon, on a fait la moyenne des profils de charge de samedi et dimanche pour obtenir un profil de charge des jours de fin de semaine. La performance thermique annuelle de chaque profil de charge est alors déterminée à l'aide du programme WATSUN IV. Les résultats sont rassemblés au Tableau 1.

Tableau 1
Effet du profil de charge sur la performance thermique annuelle

Type de profil de charge	Performance thermique annuelle (GJ/a)	Différence (%)
Système de base	80.30	0.0
Type A	80.72	0.5
Type B	84.31	5.0
Type C	79.65	-0.8
Type D	81.28	1.2
Type E	81.08	1.0
Type F	82.79	3.1
Type G	82.87	3.2
Type H	83.59	4.1
Profile de base (jours de semaine et jours de fin de semaine)	79.67	-0.8
Profil mesuré (jours de (semaine et jours de fin de semaine)	80.03	-0.3

Le Tableau 1 montre qu'une variation du profil de charge de l'eau chaude n'a pas un impact important sur la performance thermique annuelle (GJ/a) du système. La plus grande variation (5,0%) de la performance du système provient du profil de charge de type B, Figure 2. Même dans le cas des profils de charge différents pour les jours de semaine et les jours de fin de semaine (voir Figure 4), la performance thermique n'est pas modifiée de façon appréciable.

6.2 Grandeur de la charge

La performance thermique annuelle du système solaire de base pour différents rapports de la charge théorique à la consommation mesurée est estimée à l'aide du programme WATSUN IV. Les résultats indiquent que la plupart des bâtiments, dont on a étudié les besoins, exige en général moins d'eau chaude que ce qui avait été calculé théoriquement. Dans quelques cas, on a observé un rapport de la charge théorique à la consommation mesurée supérieur à 5.

Les résultats rassemblés au Tableau 2 montrent que la performance thermique du système a été réduite quand le consommation d'eau chaude domestique était moins que ce qui avait été calculé théoriquement. Par exemple, pour un rapport de 3 à 1, la prévision de la performance globale du système est réduite de 46,5%.

Tableau 2

Effets de la grandeur de la charge sur la performance thermique annuelle

Rapport de ECD réelle (L/d) / ECD théorique (L/d)	Performance thermique annuelle (GJ/a)	Différence (%)
0.20	29.73	-63.0
0.25	35.10	-56.3
0.33	42.92	-46.5
0.50	55.49	-30.9
1.00	80.28	0.0
1.20	87.12	+8.5
1.40	92.73	+15.5
2.00	105.26	+31.1
3.00	117.86	+46.8
5.00	131.20	+63.4

6.3 Température de réglage de l'eau chaude

L'équation (1) montre que la charge en énergie totale est fonction de la température de réglage de l'eau chaude. On a fait varier dans un certain nombre de simulations de WATSUN cette température par rapport à celle du système de base; et les résultats sont regroupés au Tableau 3. L'augmentation de la température de réglage de l'eau chaude (partie qualitative de la charge) donne lieu à une augmentation correspondante de la charge, bien que ceci ait un effet minime sur la performance thermique du système solaire. La température de réglage influence la performance thermique seulement lorsque l'énergie solaire fournie dépasse la charge, c'est-à-dire que la fraction d'énergie solaire dépasse 100% pour une heure donnée. Cet effet est encore plus accentué pour les températures de réglage faibles.

Tableau 3
Effets de la température de réglage sur la performance thermique annuelle

Température requise pour l'eau chaude (°C)	Performance thermique annuelle (GJ/a)	Différence (%)
60	80.30	0.0%
65	80.34	+0.05%
70	80.37	+0.09%
85	80.67	+0.46%
55	80.01	-0.36%
50	79.64	-0.82%
40	75.27	-6.26%

7. CONCLUSIONS

Pour un système solaire classique à fluide ayant un réservoir d'accumulation bien dimensionné, les paramètres de charge sont:

- la grandeur de la charge (L/d), qui influence de façon importante la performance thermique du système;
- le profil de la charge, qui n'a aucun effet significatif sur la performance thermique du système;
- la température de réglage (T_{req}), qui a un effet sur la performance thermique du système seulement lorsque le réglage est trop bas et que l'énergie solaire horaire fournie dépasse la charge, c'est-à-dire la fraction solaire est supérieure à 100%.

8. COMMENTAIRES ET RECOMMANDATIONS

La grandeur de la charge est un paramètre important qui se répercute sur la performance thermique du système. Des calculs imprécis de la charge donnent lieu à des systèmes mal dimensionnés pouvant se traduire par une défaillance des composants du système et une réduction de la performance.

On recommande que la charge de l'eau chaude soit étudiée avant le calcul théorique et l'installation d'un système de chauffe-eau solaire. On considère que cette recommandation est essentielle pour les applications de moyenne et grande échelle. Compte tenu du prix relativement faible d'un débimètre, il y a matière à réaliser là des économies importantes.

9. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Le programme de simulation informatique WATSUN IV a été rédigé par le Conseil national de recherches du Canada par System Design Energy Group, Département de génie de construction des systèmes, Université de Waterloo, Waterloo (Canada).

2. "Hot Water Load Profiles", IBI Group et Watershed Energy Systems Ltd. présenté au Conseil national de recherches du Canada, octobre 1981.

3. "An Analysis of Solar Commercial Hot Water Systems", Canadian Solar Industries Association. Rapport définitif présenté au Bureau des programmes solaires, Travaux publics Canada, avril 1982.

4. "Profiles of Promising Industries and Apartment Dwellings for Solar Systems Trails Planning", Hickling Partners Inc. Présenté au programme énergétique solaire, CNRC, décembre 1981.

5. "Consumer Hot Water Use Pattern Study", Association canadienne de l'électricité, Section des normes et de l'amélioration de la commercialisation résidentielle, 1970.

6. WATSUN III Solar Heating Simulation and Economic Evaluation Program, Liquid Based Solar Heating System, mai 1979.

7. "Laboratory Tests of Six Solar Water Heating Systems", R. Chen, Ontario Hydro, Canada. Energex '82.

8. "Optimization of Several Solar Domestic Hot Water System Parameters", J.E. Ferguson, P. Eng. and H.F. Sullivan, P. Eng. Energex '82.